

事前の周知による走行中のペースアップの認知が 呼吸循環系および酸素化ヘモグロビンの応答に及ぼす影響

右田 孝志¹⁾

キーワード：ペース変化, 長距離走, セントラルコマンド, 予測, 過渡運動

Effect of acknowledge induced by prior notice concerning speed-up on the cardiorespiratory and oxygenated hemoglobin responses during running

Takashi MIGITA

During long-distance races, an attribute of physiological responses to change in running speed could determine race performance. This study investigated whether prior knowledge about increase in running speed affected cardiorespiratory responses when running. Eight healthy male volunteers (mean \pm SD: age, 20 \pm 1 years; height, 167.3 \pm 3.9 cm; weight, 63.2 \pm 8.3 kg) participated in this study. Initially, they performed a velocity-incremental maximal test. From the results of the maximal test, running velocities corresponding to the ventilation threshold (VT) and maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2peak}$) were calculated. Second, the subjects carried out two types of 10-min transient submaximal running tests: those who had prior knowledge about running speed increase while running (aware) and those who did not (unaware). The 10-min transient running consisted of pre-increase (4 min) and post-increase (6 min) continuous running. The running velocity during the pre-increase time corresponded to the velocity at VT while the running velocity during the post-increase time corresponded to the velocity of Delta 40% (VT + [$\dot{V}O_{2peak}$ - VT] \times 0.4). Pulmonary gas exchange parameters and heart rate were measured during all exercise tests. Local muscle oxygenation profiles of the left vastus lateralis muscle were obtained using near-infrared spectroscopy. The mean value of $\dot{V}O_{2peak}$ was 3318 \pm 448.4 mL/min. The actual $\dot{V}O_2$ at pre-increase was 2083 \pm 405 mL/min (63% of $\dot{V}O_{2peak}$) for those aware and 2021 \pm 411 mL/min (61% of $\dot{V}O_{2peak}$) for those unaware, and that at post-increase was 2846 \pm 447 mL/min (86% of $\dot{V}O_{2peak}$) for those aware and 2768 \pm 385 mL/min (83% of $\dot{V}O_{2peak}$) for those unaware. There were no differences in cardiorespiratory responses prior to and at the onset of speed-up running between the aware and unaware groups. This suggests the following two possibilities: 1) descending signals from higher brain centers capable of influencing cardiorespiratory responses were absent or decreased because of intense exercise, and/or 2) imagination following the knowledge of speed-up was insufficient to drive cardiorespiratory responses while running.

Keywords: change of speed, long-distance race, central command, prediction, transient exercise

1) 久留米大学人間健康学部スポーツ医科学科

Department of Sports Medicine and Science, Faculty of Human Health, Kurume University

緒 言

長距離走レースにおいて、長距離ランナーを始め、一般的に走行時のペース変化に対する生体応答の動的特性は、競技パフォーマンスを決定する要因となり得る。何故なら、運動時のエネルギー需要／供給の観点から、ペース変化（過渡運動）に対する生体応答の遅れは生体内の恒常性をかく乱させる可能性があり、逆に、生体応答が速い場合は生体への負担度が小さくなることが予想される。そして、レース戦術として誰かがペースアップを仕掛ける場合には、それに追従することが一般的であり、両者は同じタイミングでペースアップという過渡運動を実施することになる。しかし、「仕掛ける」場合と「追従する」場合、言い換えるとペース変化のタイミングを認知しているか否かで生体応答は同様なものであろうか。

自発的に運動を始める場合は、突然に運動を始める場合よりも開始直後の筋血流量を増加させるという報告がある (Ishii et al. 2016; Williamson et al. 1995)。この背景として、運動の意図に伴い、運動開始前あるいは開始直後に高位の中枢から起こるフィードフォワード制御（セントラルコマンド）が示唆されている（松川ら 2018；二宮と松川 1991）。また、実際に運動を実施しなくても、運動をイメージすることによる呼吸循環系の亢進が報告されている (Decety et al. 1993; Whyam et al. 1995)。したがって、ペース変化を「仕掛ける」場合、そのタイミングを認知し、かつ、ペースアップ後のイメージが十分に描けていると仮定すれば、「追従する」場合よりもペース変化に対する生体への負担が軽減する結果として、レース戦術的には有利となり得る可能性が考えられる。

しかし、上述の先行研究は、安静状態からの過渡運動の場合である。これに対して、長距離走のレースにおけるペース変化は、呼吸循環系が安静時より亢進した状態からの過渡運動であり、先行研究に認められるような生体応答が起こるかどうかは不明である。そこで本研究では、長距離走レースのペース変化を想定し、一定強度運動からの過渡運動に対して、ペース変化のタイミングに関する情報を「提示する／提示しない」条件でのペース変化に対する呼吸循環系および組織酸素化レベルの応答を検討することを目的とした。そして、ペース変化のタイミングを提示した方が、ペース変化前後の呼吸循環系の応答が速くなることを仮説とした。

方 法

被験者

健康な男子大学生 8 名が本実験に参加した。被験者の年齢、身長、体重の平均値は、 20.1 ± 1.6 歳、 167.3 ± 3.9 cm、 63.2 ± 8.3 kg であった。

本実験は久留米大学御井学舎倫理委員会の承認を得て（研究番号 292）実施した。被験者には、認知・非認知条件の走運動を実施すること、走運動開始 4 分後にペースアップするプロトコルであることを含めた内容を実験の前に説明し、本実験に参加することに同意した者を被験者として研究を行った。

実験計画

被験者は最初に最大速度漸増走運動を行った。その後、後述する 2 種類の最大下走運動をそれぞれ別な日に実施した。すべての走運動は、斜度 3.0% のトレッドミル上で行った (WOODWAY 社製)。

手順

最大速度漸増走運動は安静時の測定後、120m/minで4分間の走運動に続けて1分毎に20m/min増加し、疲労困憊まで実施した。最大運動時に得られたデータをもとに、V-slop法および走速度に対する \dot{V}_E 、 $\dot{V}O_2/\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2/\dot{V}_E$ の応答から、各被験者の換気閾値（VT）に相当する走速度を算出した。

最大下走運動は、4分間の一定速度に続けて、ペースアップをしてさらに6分間の一定走速度、計10分間とした。ペースアップ前4分間の走速度には各被験者のVT相当の走速度を用い、ペースアップ後の走速度にはVT速度に最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2peak}$ ）とVTの速度差の40%相当を加えた走速度（ $VT + [\dot{V}O_{2peak} - VT] \times 0.4 = \Delta 40\%$ ）を用いた。被験者は最初にペース変化のタイミングに関する情報を提供された（認知）試行を行い、日を変えてタイミングに関する情報のない（非認知）試行を行った。認知試行はペースアップに関する正しい情報、すなわち「ペースアップ1分前、30秒前に時間を知らせ、10秒前からはカウントダウンをして教えます」と教示した。非認知試行では、「走り始めて4分後にペースアップしますが、時間は一切知らせません」という教示を行った。

測定項目

最大および最大下運動時に、呼気ガスおよび心拍数を連続して測定した。呼気ガス変量は自動呼気ガス分析装置（AE280；ミナト医科学社製、日本）を用いて、breath-by-breathで測定した。呼気ガス装置は仕様書にしたがって測定の前後で既知濃度のガスで校正した。呼気データはPCのハードディスクに保存し、後の解析に用いた。心拍数はテレメトリー法で連続して記録した（ST-19, DS-501；フクダ電子社製）。

最大下運動時に筋の酸素化／脱酸素化レベルを左脚の外側広筋に近赤外分光装置（Near-infrared spectroscopy: NIRS, Monitor BOM-L1TRW, OMEGAWAVE, Inc. Japan）を装着して測定した。本装置のセンサーは1つの光源（半導体レーザー）と2つの受光器（シリコンフォトダイオード）から成り、光源から3つの波長の異なる近赤外光（780nm, 810nm, 830nm）を照射し、光源からそれぞれ15mmと30mm離れた受光器で光を検出し、測定筋の浅部と深部の酸素化／脱酸素化レベルの測定を可能にしている。本装置の測定深度は、組織に依存するが、発光部と受光部間の距離とほぼ同程度とされ、本研究では浅部（約15mm）のデータのみを用いた。センサーは、あらかじめ剃毛した測定筋の筋腹に装着した。外部からの光遮断と動きに伴うセンサーのずれをなくすために、センサーはゴム製の黒色の専用ホルダーに装着し、その上から黒色のビニールテープで固定した。NIRSの信号は、運動開始前1分から終了まで2Hzで連続して測定し、A/D変換後にコンピュータに保存し、後の解析に用いた。

データ処理と統計的検定

最大運動中の呼気ガスのデータは毎分の後半30秒間を平均し、最も高い値をピーク値とした。最大下走運動中の呼気ガス変量、心拍数および筋の酸素化／脱酸素化レベルのデータは5秒毎に平均し、運動開始に合わせて時系列に並べて検討を行った。本研究では組織の血流量の指標として酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）を検討の対象とした。

安静時、ペース変化前および変化後の最後の30秒間の値は、対応のあるt検定を用いて条件間の差を検定した。

ペース変化に対する条件間の差を見るため、ペース変化前からの変化量を求めた。ペース変化前がVT相当の中等度強度であることから、すべての変数において、運動開始後3分から3分30秒のデータを基準とした。そして、Oxy-Hbは基準値からの変化量、呼気ガス変量および心拍数は基準値からの変化量の相対値を算出した。そして、ペース変化の認知の影響を検討することが主目的であり、ペース変化前後の比較的短時間の応答の相違を検討するという観点から、ペース変化前後1分間（運動開始後180秒から300秒）のデータについて、反復測定による2要因（認知条件×時間）の分散分析を行った（IBM SPSS Statistics 23, USA）。本研究の有意水準は5%未満とした。

結 果

被験者の最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2peak}$ ）は $3318 \pm 448.4 \text{ ml/min}$ （ $52.6 \pm 5.9 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}$ ）であった。換気閾値（VT）は $63.6 \pm 5.6\% \dot{V}O_{2peak}$ であり、それに相当する速度は $117.9 \pm 25.5 \text{ m/min}$ であった。また、ペース変化後の走速度である $\angle 40\%$ は $167.0 \pm 20.3 \text{ m/min}$ であり、 $78.1 \pm 3.3\% \dot{V}O_{2peak}$ に相当した。実際の認知・非認知試行における運動時の酸素摂取量の応答をFig.1に示した。ペースアップ前後の強度は $63-86\% \dot{V}O_{2peak}$ （認知）、 $61-83\% \dot{V}O_{2peak}$ （非認知）であった。

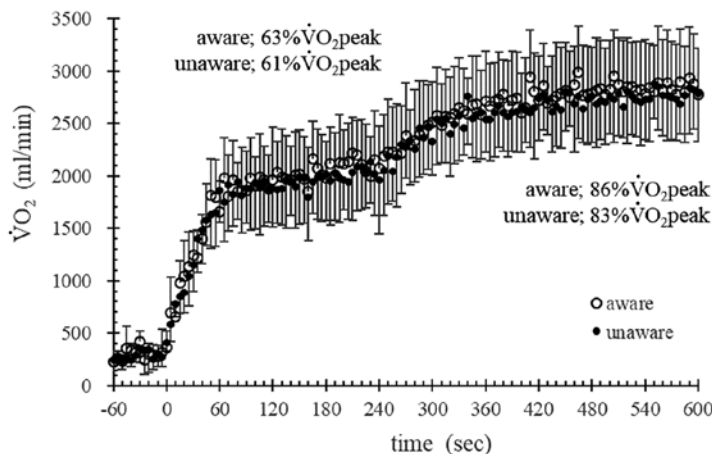


Fig.1. Oxygen uptake during aware and unaware running.

安静時、および各走行時の最後の30秒間の変数の値をTable 1に示した。呼吸数、換気量、心拍数および酸素摂取量は運動開始後に指数関数的な増加を示し、ペースアップに伴い有意に増加した。一方、定常状態におけるOxy-Hbには安静時、および各走行時に差は認められなかった。

ペース変化（運動開始後240秒）前後1分間の各変数に関して、認知・非認知による群間の特性を検討した（Fig.2）。しかし、いずれの変数においても、認知・非認知の試行間の時間応答特性に差は認められなかった。

Table 1. Values of steady state for rest, pre-increase and post-increase times.

			rest	pre-increase	post-increase
RR	n/min	aware	17.8 ± 3.7	34.6 ± 6.5	49.3 ± 4.0
		unaware	18.8 ± 3.7	37.3 ± 3.7	48.0 ± 8.6
$\dot{V}E$	L/min	aware	10.1 ± 2.5	53.4 ± 9.9	83.9 ± 11.5
		unaware	9.8 ± 1.5	52.4 ± 10.2	80.2 ± 10.8
HR	beats/min	aware	85.6 ± 11.1	146.6 ± 14	177.8 ± 7.7
		unaware	85.7 ± 10.2	138.9 ± 14.3	176.8 ± 8.7
$\dot{V}O_2$	ml/min	aware	300 ± 68	2083 ± 405	2846 ± 447
		unaware	292 ± 32	2021 ± 411	2768 ± 385
Oxy-Hb	I.U.	aware	12.7 ± 0.49	12.0 ± 0.71	12.6 ± 1.66
		unaware	13.1 ± 1.14	12.4 ± 1.02	12.8 ± 1.19

Values are mean ± SD. Rest is 1 min average, pre and post are last 30 sec average. RR, respiratory rate; $\dot{V}E$, ventilation; HR, heart rate; $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; Oxy-Hb, oxygenated hemoglobin.

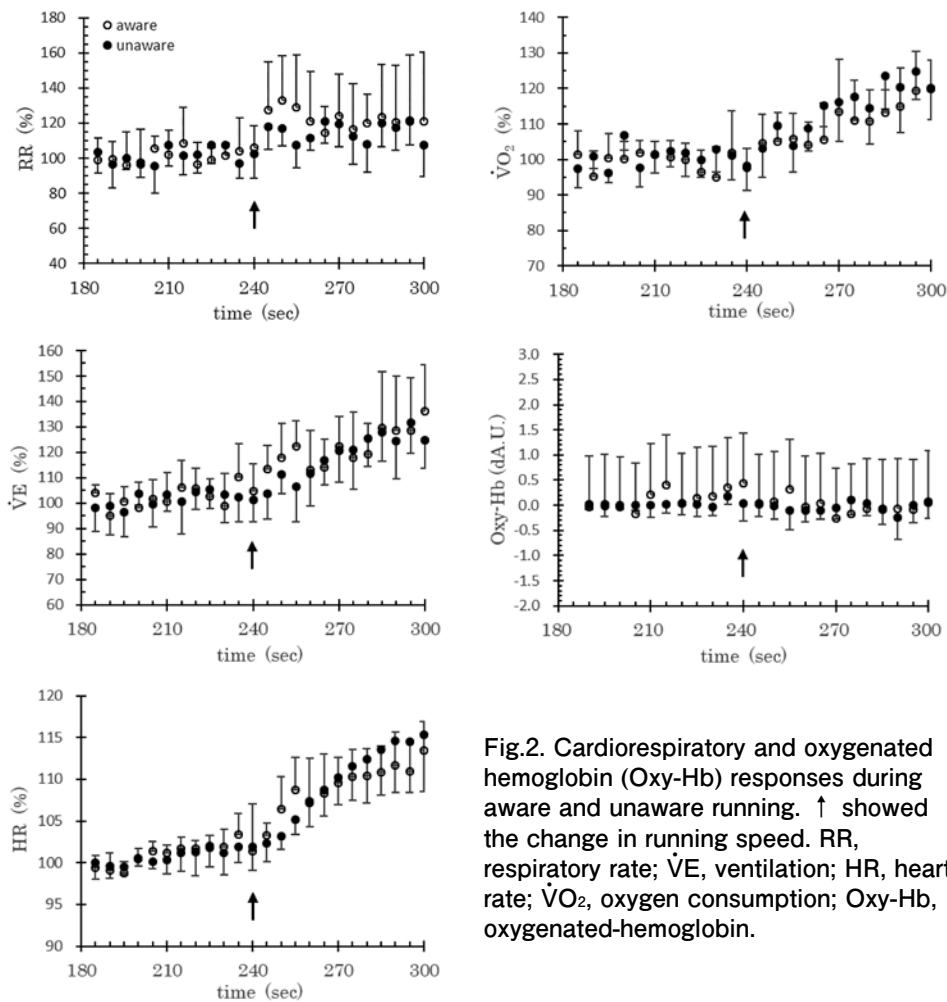


Fig.2. Cardiorespiratory and oxygenated hemoglobin (Oxy-Hb) responses during aware and unaware running. ↑ showed the change in running speed. RR, respiratory rate; $\dot{V}E$, ventilation; HR, heart rate; $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; Oxy-Hb, oxygenated-hemoglobin.

考 察

本研究では、長距離走レースにおけるペース変化のタイミングの認知・非認知の条件の相違が、ペース変化にともなう過渡運動時の生体応答に及ぼす影響を検討した。ペース変化のタイミングの認知によって高位中枢からのフィードフォワード制御（セントラルコマンド）が生じている場合、ペース変化開始と同時にもしくは直前に生体応答が速くなる可能性を仮説とした。しかし、認知・非認知の条件間に差は認められなかった。

運動の開始時もしくは開始直前の呼吸循環系に及ぼすセントラルコマンドによる見込み制御に関する研究が報告されている (Ishi et al. 2012, 2016; Miyamoto et al. 2018; Sato et al. 2009; Williamson et al. 2005)。Ishi et al. (2016) は自転車運動において、自発的に運動を開始する場合の心拍数の応答が、合図によって運動を開始する場合よりも早く増加すること示した。また、片脚自転車運動時、自発的に運動を開始した場合の筋血流量の指標として用いた非活動脚筋の Oxy-Hb が、合図で運動を開始した場合よりも応答の程度が大きいことを示した。これらのことから、自分の意志で自発的に運動を開始することによって、運動意図の発生に伴うセントラルコマンドによる循環系の見込み的な調節の関与を示唆した。同様に、Matsukawa et al. (2015) も自発的に運動を開始する場合と合図によって開始する場合、自発的な運動時の心拍数が早く増加すること示した。さらに、自発的な運動開始時の両側の前頭前野の酸素化 Hb も合図で開始する場合よりも増加することから、セントラルコマンドによる制御機構の可能性を示唆した。本研究のペース変化のタイミングの認知によって、非認知の条件と比べてセントラルコマンドによるシグナルが発生したかどうかは不明である。しかし、その結果として、本研究で検討した呼吸循環系の指標に条件間の相違は認められなかった。これはセントラルコマンドが発生したとしても、安静状態からの過渡運動ではなく、中等度強度 (VT 強度相当) の運動中という生体の条件によって、セントラルコマンドが呼吸循環系に及ぼす影響を減弱させた可能性が考えられる。Hughson and Morrissey (1982) は、安静および軽強度の運動に連続して続く過渡運動の応答を検討した (from rest to work vs from work to work)。安静からの過渡運動において、運動時の酸素摂取動態の時定数は30から40秒程度であった。しかし、軽強度運動に続く過渡運動の時定数は、それよりも遅くなる傾向を示した。同様に、Verstee et al. (1981) も安静からの過渡運動に対して、軽強度の運動に続く過渡運動時の応答速度が遅くなることを示した。メカニズムについては不明であるが、安静状態からの過渡応答に比べ、軽強度運動からの過渡応答では運動開始の神経系のシグナルの欠如、あるいは減衰のため、酸素運搬系を賦活化する作用が小さくなった可能性が示唆されている。中等度強度の運動からの過渡運動である本研究においても、高位中枢からのセントラルコマンドのシグナルの欠如あるいは減衰の結果、呼吸循環系に及ぼす影響を減弱させた可能性が考えられる。

定本 (2000) は、安静からの過渡応答ではなく、本研究と同様に運動中の負荷増加に関する教示の有無の差による生体応答を検討した。その結果、負荷増加のタイミングに関する教示のある場合、教示のない条件に比べて、負荷変化前の心拍数および換気量が有意に上昇したことを示した。実際の身体活動を伴わなくても、運動をイメージするだけで呼吸循環系が応答することが先行研究 (Decety et al. 1993; Williamson et al. 2002; Wuyam et al. 1995) で示されており、負荷変化のタイミングの教示によって被験者が増加した運動強度をイメージできた結果、予期応答が生じたことを推察している。定本 (2000) の研究と本研究の結果の相違に関する要因として、実施した運動強度の相

違の可能性がある。定本（2000）の運動強度は、負荷変化前が $40\% \dot{V}O_{2\max}$ 、負荷増加後が $50\% \dot{V}O_{2\max}$ 相当であった。本研究では、ペース変化前が $61\% \sim 63\% \dot{V}O_{2\max}$ 、ペース変化後が $83\% \sim 86\% \dot{V}O_{2\max}$ であった。本研究における被験者が、定本（2000）の研究と同様にペース変化のタイミングを認知してペース変化後をイメージできたとしても、上述したような神経系のシグナル自体がペース変化前の強度の高い運動の影響によって欠如あるいは減衰した可能性が考えられる。

ペース変化のタイミングの認知によって呼吸循環系の調節に影響が認められなかった原因として、ペース変化後の運動をイメージする程度が考えられる。Williamson et al. (2002, 2005) は実際の運動と催眠術中に運動をイメージする場合の呼吸循環系の応答を検討した。その結果、催眠状態の深い被験者では運動のイメージで呼吸循環系が応答したのに対し、浅い被験者では応答が認められなかった。このことは運動をイメージする程度が呼吸循環系の調節に影響する可能性を示唆する。Inui (1987) は鍛錬しているスプリンターの30m疾走前の心拍数が非鍛錬者よりも高いこととし、McArdel W.D. et al. (1967) は、運動開始の予測による運動前の心拍数の増加は、距離の短い60ヤードダッシュの方が長い距離の2マイル走前より大きいことを示した。これらの先行研究は、運動開始後の運動をイメージできるかどうか、もしくはイメージする意識レベルの高さが呼吸循環系の調節に影響を及ぼす可能性を示唆している。本研究の被験者は、定期的なトレーニングを実施していない非鍛錬者であり、走運動に特に慣れていることもなかった。また、カウントダウンでペース変化のタイミングの情報提供は行ったが、ペース変化に対する準備の指示は特に行わなかった。これに対して、先行研究（定本，2000）では、負荷変化の教示なしで「負荷の変化があれば、それにあわせて対応し、前もって負荷変化に準備したり、構えたりする必要はない」、負荷変化の教示ありで「タイマーを見ながら、負荷上昇に対する準備をしておいてください」という指示が与えられていた。したがって、本研究におけるペース変化のタイミングの認知・非認知の条件差が、呼吸循環系に影響を及ぼさなかった要因として、ペース変化後の対応のイメージが不十分であったため、結果として呼吸循環系を賦活化するシグナルの出力が小さかった可能性も考えられる。

ペース変化のタイミングの認知・非認知の条件差によって呼吸循環系の応答に差が認められなかった要因として、研究デザインの可能性も指摘できる。非認知条件の試行では、走行開始から一切の経過時間に関する情報を提供しないことで、ペースアップのタイミングを計ることができないと考えられた。したがって、被験者が非鍛錬者であり、特に走運動に慣れていただけでもなかったので、最初に認知条件の試行を実施し、日を変えて非認知条件の試行を行った。しかし、最初に行った認知条件の試行によって、非認知条件であっても何らかの経過時間に関する情報を獲得し、ペースアップのタイミングに対するある程度の準備ができた可能性は否定できない。その結果、認知・非認知の条件差が呼吸循環系の応答に差を及ぼすほどではなかったのかもしれない。したがって、事前に走運動の練習を十分に行って安全性を確保したうえで、最初に非認知条件での施行を行う実験デザインとすべきだったと思われる。

本研究は長距離走レースのペース変化に着目して、ペース変化のタイミングの認知・非認知の条件差がペース変化を伴う過渡運動時の呼吸循環系に及ぼす影響を検討した。運動の意図にともない高位中枢からのシグナルが呼吸循環系をフィードフォワード制御する（セントラルコマンド）ことが示されているので、本研究においてもタイミングの認知によってペース変化前後の呼吸循環系に促進的な応答のある可能性を仮説とした。しかし、本研究ではペース変化のタイミングの認知・非認知の条件差による呼吸循環系応答の違いは認められなかった。仮説と異なる結果の要因として、

安静時からの過渡運動ではなく運動中の過渡応答であり，運動の意図にともなうセントラルコマンドの欠如もしくは減衰の可能性，ペース変化の認知による運動イメージのレベルが不十分であった可能性，もしくは最初に認知条件の試行を実施したことによる影響の可能性，それらの結果として呼吸循環系の応答に条件間の相違が認められなかったものと思われる。

付 記

本研究は平成28年度科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金，基盤研究 C，課題番号：16K01715，研究代表者：右田孝志）の交付を受けて行った研究である。

文 献

- Decety J., Jeannerod M., Durozard D. and Baverel G. (1993) Central activity of autonomic effectors during mental simulation of actions in man. *J. Physiol.*, 461: 549-563.
- Hughson R.L. and Morrissey M. (1982) Delayed kinetics of respiratory gas exchange in the transition from prior exercise. *J. Appl. Physiol.*, 52: 921-929.
- Inui N. (1987) Anticipatory cardiac responses to two running events. *J. Human Ergol.*, 16: 19-29.
- Ishi K., Liang N., Oue A., Hirasawa A., Sato K., Sadamoto T. and Matsukawa K. (2012) Central command contributes to increased blood flow in the noncontracting muscle at the start of one-legged dynamic exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, 112: 1961-1974.
- Ishi K., Matsukawa K., Liang N., Endo K., Idesako M., Asahara R., Kadowaki A., Wakasugi R. and Takahashi M. (2016) Central command generated prior to arbitrary motor execution induces muscle vasodilation at the beginning of dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.*, 120: 1424-1433.
- 松川寛二・浅原亮太・石井 圭 (2018) セントラルコマンドによる見込み制御. *体育の科学*, 68: 636-643.
- Matsukawa K., Ishi K., Liang N., Endo K., Ohtani R., Sadamoto T., Wakasugi R., Kadowaki A. and Komine H. (2015) Increased oxygenation of the cerebral prefrontal cortex prior to the onset of voluntary exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, 119: 452-462.
- McArdle W.D., Foglia G.F. and Patti A.V. (1967) Telemetered cardiac response to selected running events. *J. Appl. Physiol.*, 23: 566-570.
- Miyamoto T., Ito G. and Nakahara H. (2018) A significant role of feedforward cardiorespiratory control by higher brain center to dynamic exercise. *Proc. Life Engineering*, 18: 124-129.
- 二宮石雄・松川寛二 (1991) 意識と自律神経活動－循環調節を例として－. *BME*, 5: 59-68.
- 定本朋子 (2000) 急激な負荷変化に関する予測が呼吸循環応答に及ぼす影響. *デサントスポーツ科学*, 21: 177-183.
- Sato K., Moritama M. and Sadamoto T. (2009) Influence of central command on cerebral blood flow at the onset of exercise in women. *Exp. Physiol.*, 94: 1139-1146.
- Versteeg P.G.A., Sampurno S.B., Sipkema P. and Elzinga G. (1981) Control of cardiac output in exercise dogs using different types of workload. *Cardiovasc. Res.*, 15: 151-158.
- Williamson J.W., Fadel P.J. and Mitchell J.H. (2005) New insights into central cardiovascular control during exercise in humans: a central command update. *Exp. Physiol.*, 91: 51-58.
- Williamson J.W., McColl R., Mathews D., Mirchell J.H., Raven P.B. and Morgan W.P. (2002) Brain activation by central command during actual and imagined handgrip under hypnosis. *J. Appl. Physiol.*, 92: 1317-1324.
- Williamson J.W., Nobrega A.C.L., Winchester P.K., Zim S. and Mitchell J.H. (1995) Instantaneous heart rate increase with dynamic exercise: central command and muscle-heart reflex contribution. *J. Appl. Physiol.*, 78: 1273-1279.

Wuyam B., Moosavi S.H., Decety J., Adams L., Lansing R.W. and Guz A. (1995) Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen. *J. Physiol.*, 482: 713-724.

(2020.10.8. 受付 2020.12.15. 受理)